



УДК 624.131

Готман Н.З. – доктор технических наук**Готман А.Л.** – доктор технических наук, профессорE-mail: gotmans@mail.ru**НИИОСП им. Н.М. Герсеванова**

Адрес организации: 109428, Россия, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д. 6с12

Определение модуля деформации закрепленного цементацией грунта

Аннотация

Постановка задачи. Целью работы являлся расчет модуля деформации закрепленного грунта, исходя из физических характеристик природного грунта и объема инъецируемого раствора.

Получено аналитическое решение для определения модуля деформации на основе допущения о заполнении цементным раствором объема пор, не занятых поровой водой. На первом этапе определяется объем инъецируемого раствора из условия заполнения порового пространства, затем определяется значения коэффициента пористости и модуля деформации закрепленного грунта.

Результаты. Используя корреляционную связь между модулем деформации и коэффициентом пористости в соответствии с СП 22.13330.2011, получено аналитическое решение для определения модуля деформации закрепленного грунта. Дается сравнение опытных и расчетных значений, а также показана их удовлетворительная сходимость. Установлена возможность использования аналитических формул для определения объема цементного раствора, требуемого при закреплении грунта.

Выводы. Полученные аналитические решения могут быть успешно использованы при разработке проектов укрепления оснований цементацией для определения модуля деформации укрепленных грунтов в зависимости от объема инъецируемого раствора.

Ключевые слова: модуль деформации, закрепленный грунт, цементация.

Введение

Модуль деформации укрепленного цементацией грунта является основной характеристикой грунтового массива при выполнении геотехнических расчетов:

- ограждающих конструкций котлованов с укреплением грунта для снижения горизонтального давления [1, 2, 3];
- фундаментов зданий и сооружений, проектируемых на искусственно укрепленных основаниях [4, 5, 8, 9];
- геотехнических мероприятий противокартовой защиты путем цементации покровной толщи над карстующимися грунтами [6].

В статье изложена методика определения модуля деформации закрепленного цементацией грунта основания, подтвержденная экспериментом.

При инъекции раствора в грунт, последний упрочняется за счет изменения компактной упаковки твердых частиц с уменьшением пористости [10]. При этом происходит изменение не только физических характеристик грунта, но и повышение механических характеристик, в том числе деформационной характеристики – модуля деформации. Поэтому поставим задачу определения модуля деформации закрепленного грунта.

Определение модуля деформации закрепленного грунта

При напорной цементации в грунтовое основание внедряется раствор, который сжимает окружающий грунт, уменьшая его пористость. Минеральные частицы грунта считаются несжимаемыми.

Определим объем раствора, требуемого для ликвидации воздушной части пор без фильтрации поровой воды.

Объем пор в единице объема грунта:

$$n = (\gamma_s - \gamma_d) / \gamma_s \quad (1)$$

Вес воды в единице объема:

$$V_e = \gamma - \gamma_d = \omega \cdot \gamma_d \quad (2)$$

где ω – влажность;
 γ_d – вес сухого грунта;
 γ_s – вес минеральных частиц;
 γ – объемный вес грунта.

Все эти физические характеристики определяются лабораторным путем и включаются в состав стандартного отчета об инженерно-геологических изысканиях.

Тогда объем воздуха (объем пор, не занятых поровой водой):

$$V_{\text{возд}} = \frac{g_s - g_d}{g_s} - w \cdot g_d = \frac{g_s - g_d \cdot (1 + wg_s)}{g_s} = 1 - \frac{g_d}{g_s} \cdot (1 + w \cdot g_s). \quad (3)$$

Таким образом, используя формулу (3), можно определить объем необходимого для закрепления раствора, при котором грунт получает полное водонасыщение без отжатия воды из пор.

При инъецировании раствора в объеме, большем определяемого по формуле (3), происходит дальнейшее уменьшение пористости за счет фильтрации грунта в соседние области.

Для определения модуля деформации закрепленного грунта примем следующие допущения:

1. При инъецировании раствора в грунт уменьшение объема пор происходит вследствие их замещения нагнетаемым раствором.

2. Фактический объем инъецированного раствора в грунт определяется способностью грунта уплотняться и способностью фильтровать поровую воду за пределы укрепляемого объема грунта.

Таким образом, решение поставленной задачи сводится к следующему.

Зная объем инъецированного раствора в единичный объем грунта с известной пористостью и известным модулем деформации E , следует определить модуль деформации закрепленного грунта E_y .

Известно, что коэффициент пористости грунта e определяется как:

$$e = n/m, \quad (4)$$

где n – объем пор в единице объема, m – объем твердых частиц в единице объема.

Следовательно, полный объем грунта:

$$V = n + m. \quad (5)$$

При инъецировании раствора в объеме V_p в грунт объем пор уменьшается на величину V_p , а объем твердых частиц увеличивается на V_p . Здесь принято, что цементный раствор после твердения является твердым несжимаемым телом с нулевой пористостью.

Тогда коэффициент пористости закрепленного грунта e_y становится равным:

$$e_y = \frac{(n - V_p)}{(m + V_p)}. \quad (6)$$

Объем твердых частиц m численно равен отношению веса твердых частиц в единице объема (численно равным весу сухого грунта в единице объема γ_d) к их удельному весу γ_s , т.е.

$$m = \frac{g_d}{g_s}. \quad (7)$$

Объем пор в единице объема равен n :

$$n = 1 - \frac{g_d}{g_s}. \quad (8)$$

Тогда коэффициент пористости e_y закрепленного грунта путем инъецирования в единицу объема грунта раствора объемом V_p равен:

$$e_y = \frac{1 - \frac{g_d}{g_s} - V_p}{\frac{g_d}{g_s} + V_p} = \frac{g_s \cdot (1 - V_p) - g_d}{g_d + V_p \cdot g_s}. \quad (9)$$

Величину модуля деформации укрепленного грунта E_y определим следующим образом. При сжатии грунта в условиях невозможности поперечного расширения зависимость между коэффициентом пористости e и сжимающим напряжением σ (компрессионная кривая сжимаемости) может быть выражена несколькими видами уравнений.

Наиболее достоверным из них, подтвержденным многочисленными экспериментами, является ее выражение логарифмической кривой [7]. Соответственно, обратная зависимость является экспоненциальной. Принимая связь между сжимающим напряжением и модулем деформации линейной, можно принять зависимость E_y от e также в виде экспоненциальной кривой.

$$E_y = E \cdot \exp[k \cdot (e - e_y)], \quad (10)$$

где k – коэффициент, характеризующий деформируемость грунта конкретного вида, который определяется в соответствии с предложенным в работе [7] методом путем поиска наилучшего коэффициента корреляции при сравнении табличных данных СП 22.13330.2011 «Основания зданий и сооружений» и формулы (10).

На рис. 1-2 приведены примеры сравнения зависимостей $E=f(e)$ для мелкого песка при $k=3,4$ и супеси при $k=3,7$. Здесь мелкий песок и супесь рассматриваются как виды грунтов, которые с наибольшей эффективностью могут подвергаться закреплению.

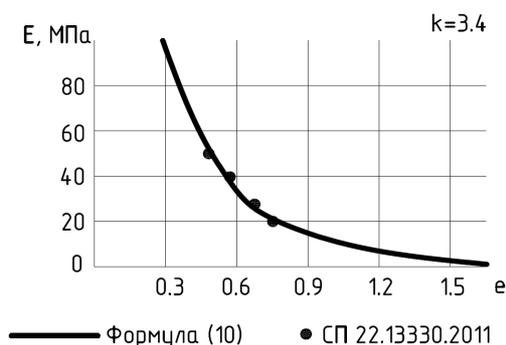


Рис. 1. Зависимость модуля деформации от коэффициента пористости для мелкого песка

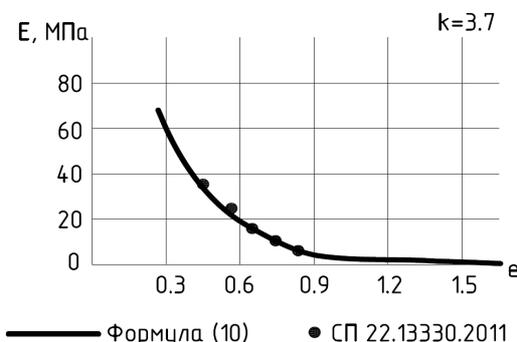


Рис. 2. Зависимость модуля деформации от коэффициента пористости для супеси

Таким образом, формула (10) позволяет определить модуль деформации закрепленного грунта при известном модуле деформации E , коэффициенте пористости незакрепленного грунта e и коэффициенте пористости закрепленного грунта e_y .

Далее решим следующую важную для практики задачу.

Какой объем раствора нужно закачать на единицу объема грунта, чтобы получить требуемый модуль деформации E_y .

Известными величинами являются:

E – модуль деформации незакрепленного грунта;

E_y – требуемый модуль деформации;

e – коэффициент пористости незакрепленного грунта.

Требуется определить требуемый коэффициент пористости e_y и затем определить требуемый объем раствора для инъецирования на единицу объема V_p .

Решая формулу (9) относительно V_p , получим:

$$V_p = \frac{g_s - g_d(1 + e_y)}{g_s(1 + e_y)}. \quad (11)$$

Значение искомого e_y определяем из уравнения (10):

$$e_n^{ke_y} = \frac{E_y}{E} \cdot e_n^{ke}, \quad (12)$$

где e_n – неперово число, равно 2,72.

Отсюда:

$$e_y = \log_{e_n^k} \frac{E_y}{E} (e_n^k)^e.$$

Применяя формулу перехода к логарифму с десятичным основанием, имеем:

$$e_y = \frac{\lg \frac{E_y}{E} (e_n^k)^e}{\lg e_n^k}. \quad (13)$$

Таким образом, для решения поставленной задачи требуется определить по формуле (13) значение e_y , а затем по формуле (11) значение требуемого объема раствора на единичный объем закрепляемого грунта.

Следует отметить, что решение поставленной задачи выполнено без учета влажности w и степени влажности J_r .

При решении практических задач при проектировании закрепления на первом этапе можно определить количество раствора V_6 , который можно закачать в грунт без фильтрации (отжатия) поровой воды используя формулу (3) с подстановкой вместо $V_{возд}$ значения V_6 .

Затем с использованием значения V_6 определяется модуль деформации E_y по формуле (10). В пределах этого объема раствора (V_6) можно осуществлять «быстрое» инъецирование, так как уменьшение пористости происходит за счет уменьшения пор без отжатия поровой воды.

Если полученное значение E_y недостаточно из условий требования проекта, то определяется дополнительный объем раствора по формуле (10) и эту часть раствора рекомендуется инъецировать с меньшей скоростью с учетом необходимости фильтрации поровой воды за пределы зоны закрепления.

Учет этого фактора наиболее актуален для закрепления грунтов с тонкодисперсной структурой – мелких песков, супесей и суглинков.

Экспериментальная проверка

По специально разработанному проекту была выполнена укрепительная цементация основания жилого дома на глубину 15 м ниже фундаментной плиты. Путем инъециции цементного раствора по сетке 3х3 м в пределах контура фундаментной плиты дома были затампонированы все разуплотненные зоны и каверны. В процессе укрепления проводился геотехнический контроль соответствия параметров инъециции требованиям проекта.

Для оценки характеристик закрепленных грунтов выполнялось бурение, отбор монолитов и испытание образцов закрепленного грунта на одноосное сжатие.

Коэффициент пористости e_3 закрепленного грунта определен используя фактические характеристики закрепленных грунтов:

$$e_3 = (\gamma_{np} - \gamma_{ск}) / \gamma_{ск}, \quad (14)$$

где e_3 – коэффициент пористости, полученный по фактическим данным;

γ_{np} – объемный вес закрепленного грунта;

$\gamma_{ск}$ – объемный вес скелета закрепленного грунта.

Расчет характеристик E_y , e_y , был произведен по методике, описанной выше, по формулам (9, 10).

Значение коэффициента k принято равным 1,7 (рис. 3).

Результаты расчетных и опытных значений коэффициента пористости и модуля деформации закрепленных грунтов представлены в табл.

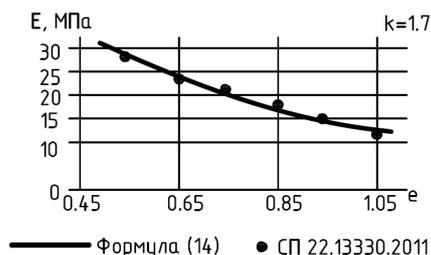


Рис. 3. Зависимость модуля деформации от коэффициента пористости для глин и суглинков

Таблица

Физико-механические характеристики грунтов

	Влажность, %		Объемный вес, γ , г/см ³				Объем поглощенного цементного раствора на 1 м заходки V_p , м ³	Коэффициент пористости			Модуль деформации, Е, МПа		
			Природ.		Скелета			Природный, e	Экспериментальный, после закрепления, e_z	Расчетный после закрепления, e_v	Е, МПа		
	До закрепления	После закрепления	До закрепления	После закрепления	До закрепления	После закрепления					Природный, E	Экспериментальный, после закрепления, E_z	Расчетный, после закрепления, E_v
ИГЭ1 Глина полутвердая	24,6	16,1	1,93	2,3	1,55	1,74	1,36	0,778	0,162	0,245	18	49,9	43,5
ИГЭ2 Глина карбонатная	20,1	10,5	1,94	1,98	1,62	1,67	1,36	0,681	0,108	0,197	27	69,7	60,2
ИГЭ2 Глина карбонатная	24,6	10,3	1,93	2,14	1,55	1,8	1,46	0,778	0,103	0,172	18	49,9	43,51

Анализ данных таблицы показывает, что расхождение опытных и расчетных значений модуля деформации закрепленного грунта не превышает 20 %, что подтверждает возможность использования аналитических формул (11 и 13) для прогноза требуемого объема цементного раствора исходя из требуемого модуля деформаций.

Заключение

1. В результате выполненного исследования теоретически решена задача упрочнения грунта при инъекции цементного раствора и получены формулы для определения модуля деформации закрепленного грунта в зависимости от коэффициента пористости и объема инъецируемого грунта от модуля деформаций.

2. Выполнена экспериментальная проверка полученных зависимостей в глинистых грунтах, в результате которой расхождение опытных и расчетных данных не превысило 20 %.

Список библиографических ссылок

1. Готман А. Л., Готман Ю. А. Расчет параметров закрепления грунтов ограждения глубоких котлованов // Жилищное строительство. 2012. № 11. С. 8–11.
2. Зега С. О., Бroyд И. И. Расчет параметров процесса сооружения подземных конструкций, сооружаемых с помощью струйной геотехнологии // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2010. № 6. С. 14–17.
3. Черняков А. В. Применение струйной цементации грунтов в условиях исторической застройки // Жилищное строительство. 2011. № 9. С. 24–26.
4. Юлин А.Н. Инженерно-геологические аспекты геотехнического контроля при создании искусственных песчаных оснований // Инженерные изыскания. 2010. № 10. С. 28–32.
5. Исаев Б. Н., Бадеев С. Ю., Лунев А. Г., Цапкова Н. Н., Логутин В. В., Кузнецов М. В., Бадеев В. С., Опыт закрепления грунтов цементогрунтовыми элементами // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2010. № 5. С. 29–32.
6. Готман Н. З., Вагапов Р.Р. Расчет мощности сцементированных грунтов как меры противокарстовой защиты зданий и сооружений//Вестник гражданский инженероv. 2013. № 4 (39). С. 119–124.
7. Ланеес А. Л. Определение модуля деформации армированного инъектированным раствором грунта: Труды юбилейной конференции, посвященной 50-летию РОМГТиФ «Российская геотехника – шаг в XXI век». Том 2. М., 2007. 109 с.
8. Abir Al-Tabbaa. Soil stabilization: surface mixing and laboratory mixtures: Proc. ISSMGE – TC 211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI / Brussels, 31 May and 1 June. 2012. V. 1. P. 67–83.
9. Huybrechts N., Denies N. General Report of TC 211-Ground Improvement: Proc. Of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Vol. 1. Paris, 2013. P. 2417–2424.
10. Grisolia M., Leder E., Marzano I. P. Standardization of the molding procedures for stabilized soil specimens as used for QC/QA in Deep Mixing application: Proc. Of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Vol. 1. Paris, 2013. P. 2481–2484.

Gotman N.Z. – doctor of technical sciences

Gotman A.L. – doctor of technical sciences, professor

E-mail: gotmans@mail.ru

NIOSP named after N.M. Gersevanov

The organization address: 09428, Russia, Moscow, 2nd Institutskaya st., 6/12

Determination of the deformation modulus strengthened by ground cementing

Abstract

Problem statement. The aim of the work done was to calculate strengthened ground's modulus of deformations based on the physical characteristics of the natural soil and the volume of the ground injection solution.

The analytical solution for defining modulus of deformation, based on assumptions of cement filling the pores' volume, which are free from pore water, is obtained. In the first step, the volume of the solution for ground injection is determined and then the coefficient of soil porosity and modulus of deformations of strengthend ground is determined.

Results. By using correlation between the deformation modulus and the coefficient of soil porosity in accordance with SP 22.13330.2011 (Foundations of buildings and structures), the analytical solution for the strengthened ground's modulus of deformation is determined. The comparison between experimental and calculated values is made and their convergence is shown. The possibility of using analytic formulas for determining required volume of the solution for strengthend ground is established.

Conclusion. Founded analytical solutions can be successfully used for designing strengthening cementation grounds for determining the modulus of strengthened soil's deformations, depending on the volume of the injectable solution.

Keywords: Modulus of deformations, strengthened ground, cement grouting.

References

1. Gotman A. L., Gotman Y. A Design of parameters of the deep excavations fences strengthening // *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 2012. № 11. P. 8–11.
2. Zege S. O., Broid I. I. Design of parameters of underground structure construction, being erected with the usage of jet geotechnology // *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*. 2010. № 6. P. 14–17.
3. Chernyakov A. V. Application of jet grouting in conditions of historic buildings // *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 2011. № 9. P. 24–26.
4. Yulin A.N. Geotechnical aspects of geotechnical control in the creation of artificial sandy grounds // *Inzhenernyye izyskaniya*. 2010. № 10. P. 28–32.
5. Isayev B. I., Badeev S. Yu., Lunev A. G., Tsapkova N. N., Logutin V. V., Kuznetsov M. V., Badeev V. S. Experience of soil strengthening by cement-soil elements // *Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov*. 2010. № 5. P. 29–32.
6. Gotman N. Z., Vagapov R. R. Analysis of cement-bound soil thickness as a measure of anti-karst protection of buildings and structures // *Vestnik grazhdanskiy inzhenerov*. 2013. № 4 (39). P. 119–124.
7. Lanes A. L. Determination of the deformation modulus for the soil reinforced by injection solution : Proc. jubilee conference on the 50th anniversary of Romggif «Russian geotechnics – a step in the XXI century». Vol. 2. M., 2007. 109 p.
8. Abir Al-Tabbaa. Soil stabilization: surface mixing and laboratory mixtures: Proc. ISSMGE – TC 211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI / Brussels. 31 May and 1 June. 2012. v. 1. P. 67–83.
9. Huybrechts N., Denies N. General Report of TC 211-Ground Improvement: Proc. Of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Vol. 1. Paris, 2013. P. 2417–2424.
10. Grisolia M., Leder E., Marzano I. P. Standardization of the molding procedures for stabilized soil specimens as used for QC/QA in Deep Mixing application: Proc. Of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Vol. 1. Paris, 2013. P. 2481–2484.